

**Paolo Mogorovich**

# **Sistemi Informativi Territoriali**

**Appunti dalle lezioni**

## **Morfologia**

**Cod.401 - Vers.CC5**

- 1 - Il modello di elevazione**
- 2 - DEM, DSM e DTM**
- 3 - La costruzione di un DEM**
- 4 - Dati derivati da un DEM**
- 5 - TIN: Triangulated Irregular Network**

## 1 – Rappresentazione della morfologia

Intendiamo per Morfologia l'insieme degli strumenti e metodi che utilizziamo per rappresentare ed elaborare le informazioni relative alle forme del terreno.

La forma del terreno è un'informazione estremamente importante in quanto moltissime applicazioni nei campi dell'urbanistica, dell'ambiente, della geologia, ecc. richiedono questo tipo di conoscenza.

La cartografia per rappresentare le forme del terreno utilizza due strumenti:

- a) le curve di livello o isoipse. Sono uno strumento adatto a qualunque tipo di scala ed presentano interessanti caratteristiche:
  - dal punto di vista dell'analisi visiva, le isoipse ci forniscono informazioni relative alla pendenza, all'esposizione, agli impluvi, ai crinali, ecc. Questo è dovuto alla nostra capacità di analisi, per cui la densità delle curve di livello ci fa percepire una pendenza più o meno elevata e la direzione dei fasci di curve di livello ci dice l'orientamento di un versante. La forma delle curve, in particolare serie di forme a "V" innestate una dentro l'altra, vengono facilmente interpretate, a seconda dei casi, come impluvi o crinali;
  - da un punto di vista di analisi quantitativa, dalle isoipse è possibile risalire rapidamente ai valori di pendenza ed esposizione
  - per la loro natura, le isoipse hanno il grande vantaggio di essere più dense dove la variazione del fenomeno è elevata e meno dense altrove;
  - quando serve sono facilmente inseribili curve di livello secondarie.
- b) I punti quotati: riportano misure di quota in genere più accurate, a parità di scala, di quelle delle curve di livello. I punti quotati vengono rilevati dall'operatore lì dove l'informazione è necessaria. Sono particolarmente utili alle grandi scale.

Si noti che la cartografia, nel rappresentare la forma del territorio, utilizza strumenti di tipo vettoriale (linea e punto): questa è in un certo senso una scelta obbligata, visto che lo strumento usato dal cartografo, la "penna", è per sua natura uno strumento vettoriale.

Essendo la forma del terreno una superficie, si potrebbe pensare di rappresentarla in modo analitico tramite una funzione  $z = f(x,y)$ . Questo è impensabile per superfici di dimensioni estese, ma è utile per piccolissimi intorni, nel processo di interpolazione.

Nell'organizzare un archivio di dati territoriali, il modello più usato per memorizzare le informazioni relative alla morfologia è quello raster. I dati così memorizzati si prestano molto bene ad essere elaborati, anche se non altrettanto bene ad essere visualizzati, salvo ricorrere a visualizzazioni tridimensionali. Inoltre, poiché in un layer raster, i pixel hanno tutti, salvo casi eccezionali, le stesse dimensioni, avremo un "campione" per ciascuna microzona di territorio, sia che nei dintorni la quota sia pressoché costante, sia che vari in modo significativo. In pratica, data una zona a morfologia mista (pianure e rilievi), avremo pixel sempre con le stesse dimensioni, e, presumibilmente, pixel inutilmente densi nelle zone pianeggianti e pixel pericolosamente radi nelle zone montuose. Si noti come, da tutti i punti di vista, le curve di livello abbiano caratteristiche concettuali superiori al modello raster (analisi visiva, densità variabile, possibilità di raffinamento), ma per contro il dato raster ha l'enorme vantaggio di essere elaborabile tramite programmi SW che usano algoritmi semplici e quindi veloci ed economici.

I dati raster che rappresentano le quote del terreno sono matrici di dimensioni spesso considerevoli, tipicamente decine di milioni di elementi. Ogni pixel è l'immagine di un'area elementare, indicativamente da

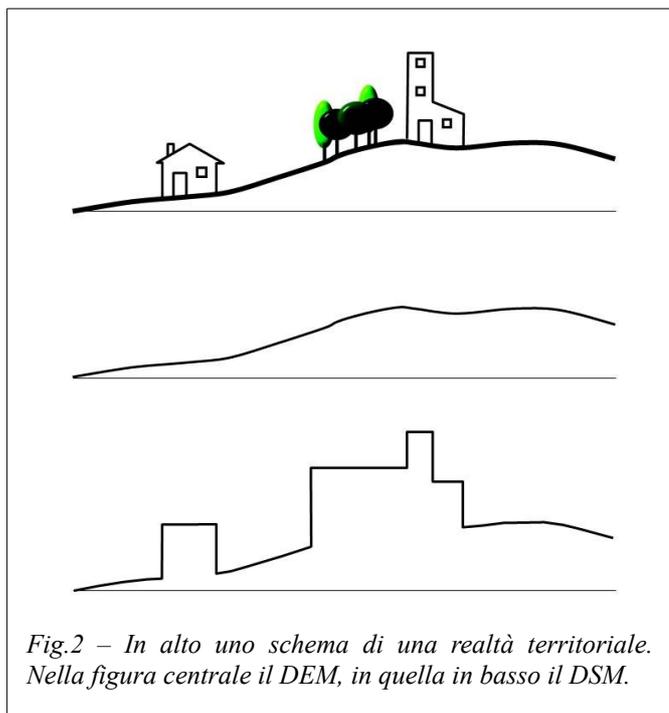
	10	10	13	17	20	24	29	30	30
	10	11	16	19	23	25	29	30	30
	10	12	18	20	24	28	29	30	30
	14	16	20	22	25	28	29	30	30
	19	20	21	26	28	29	30	30	30
	20	20	24	28	30	30	30	30	30

*Fig.1 – In una matrice di quote ogni pixel rappresenta un'area elementare e ad essa è associata una quota. Nella realtà le matrici di quote sono molto grandi e raggiungono facilmente dimensioni di decine di milioni di pixel.*

1x1 m a 1000x1000 m e il valore associato indica la quota di quell'area; a seconda del processo di acquisizione può essere la quota media dell'area, la quota del punto centrale o una quota estrema (la quota massima o quella minima presente nell'area); questa precisazione perde significato se il pixel è abbastanza piccolo rispetto alla variabilità della grandezza considerata.

## 2 – DEM, DSM e DTM

Una matrice georeferenziata di valori che esprimono l'altitudine del terreno è comunemente chiamata DEM (Digital Elevation Model) o DTM (Digital Terrain Model).



Un DEM, tuttavia, può essere inteso in due modi, a seconda degli oggetti che concorrono alla definizione di "terreno". Se consideriamo solo la superficie del terreno, trascurando manufatti (tipicamente gli edifici) e oggetti naturali che stanno sopra la superficie terrestre (tipicamente gli alberi), si parla di DEM o DTM; se invece si considerano anche elementi costruiti dall'uomo si parla di DSM (Digital Surface Model). Vedi Fig.2.

È evidente che in questo secondo caso ci troviamo a operare a scale relativamente grandi e per fenomeni specifici (esondazioni, inquinamento acustico, ecc.).

Anche se gli acronimi DEM e DTM vengono usati in genere con lo stesso significato, alcuni studiosi riservano al DEM il significato di matrice di quote, mentre intendono come DTM una conoscenza più completa della forma

del territorio, basata su un DEM, ma anche su pendenze, esposizioni e eventualmente altre informazioni.

## 3 – La costruzione di un DEM

Esistono diversi modi per costruire un modello di elevazione del terreno:

1. Con tecniche aerofotogrammetriche
2. A partire da una carta disegnata, con sistemi semiautomatici
3. A partire da cartografia numerica, con curve di livello e punti quotati digitalizzati, tramite campionamento e interpolazione
4. Con il sistema Lidar

### Caso 1

È possibile ottenere modelli di elevazione del terreno direttamente da coppie di aerofotografie (ma anche da coppie di immagini telerilevate da satellite) trattate con tecniche fotogrammetriche. Per ottenere risultati di buona qualità, le due immagini che formano una coppia devono rispettare certe caratteristiche ben definite dalla fotogrammetria, relative all'altezza, all'angolo di ripresa, alla risoluzione, alla sovrapposizione.

### Caso 2

Il metodo proposto al punto 2 è un modo grafico-analitico per costruire un DEM a partire da curve di livello. È un sistema laborioso, utilizzato qualche volta in passato, interessante dal punto di vista didattico.

Si parte da una carta disegnata, su cui si appoggia il grigliato corrispondente alla tassellazione del territorio; le caratteristiche del modello raster (origine, orientazione, dimensione del pixel) sono state oggetto di una precedente definizione. Dato il centro P di un pixel (la procedura va ripetuta per ciascun centro di pixel) si traccia un segmento passante per P avente come estremi le intersezioni con le prime due curve di livello incontrate a quote diverse. È importante scegliere, tra tutti i segmenti possibili che rispettano questa condizione, il più corto. Si ottengono così due punti, A e B (Fig.3), caratterizzati

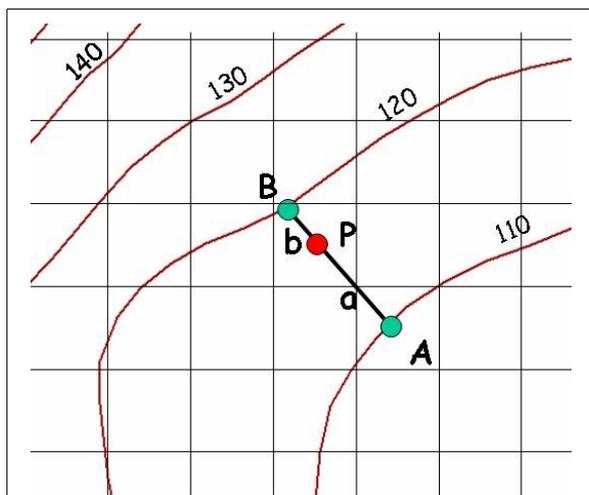


Fig.3 – La quota nel punto P sarà compresa tra quella nel punto A e quella nel punto B, in proporzione alla lunghezza dei tratti “a” e “b”..

ciascuno da una posizione, ricavata dal sistema di riferimento presente sulla carta, e da una quota, ottenuta dalle curve di livello.

La quota nel punto P sarà compresa tra la quota del punto A e quella del punto B, in proporzione alla lunghezza dei tratti “a” e “b”. Se  $Q_A$  e  $Q_B$  sono le quote dei punti A e B, ricavabili dalle quote delle curve di livello, la quota di P sarà:

$$Q_P = Q_A + (Q_B - Q_A) * (a / (a + b))$$

L'utilizzo di questa formula si basa sull'ipotesi che la quota vari linearmente tra una curva di livello e la successiva; questo ovviamente non è vero (anche se la tecnica cartografica ci dice che se la variazione di quota fosse molto irregolare, avremmo probabilmente una curva di livello ausiliaria) ed è uno dei motivi, non quello decisivo, per cui è importante che il segmento che abbiamo tracciato tra A e B sia, tra quelli possibili, il più corto; in questo modo

si riduce al minimo l'effetto delle irregolarità.

L'algoritmo può essere perfezionato per alcuni casi in cui non è possibile tracciare il segmento secondo il modello proposto.

Questo metodo è relativamente complesso; ovviamente se il tracciamento del segmento avviene manualmente, esso può essere usato solo per un numero limitato di pixel.

### Caso 3

È abbastanza comune il caso in cui si ottengono DEM a partire da curve di livello e punti quotati provenienti da dati cartografici (Fig.4). È questo il caso in cui sono disponibili curve di livello numeriche provenienti dalla digitalizzazione di cartografia esistente, oppure da curve di livello e punti quotati prodotto di appalti di cartografia numerica.

L'operazione è fatta da due passi:

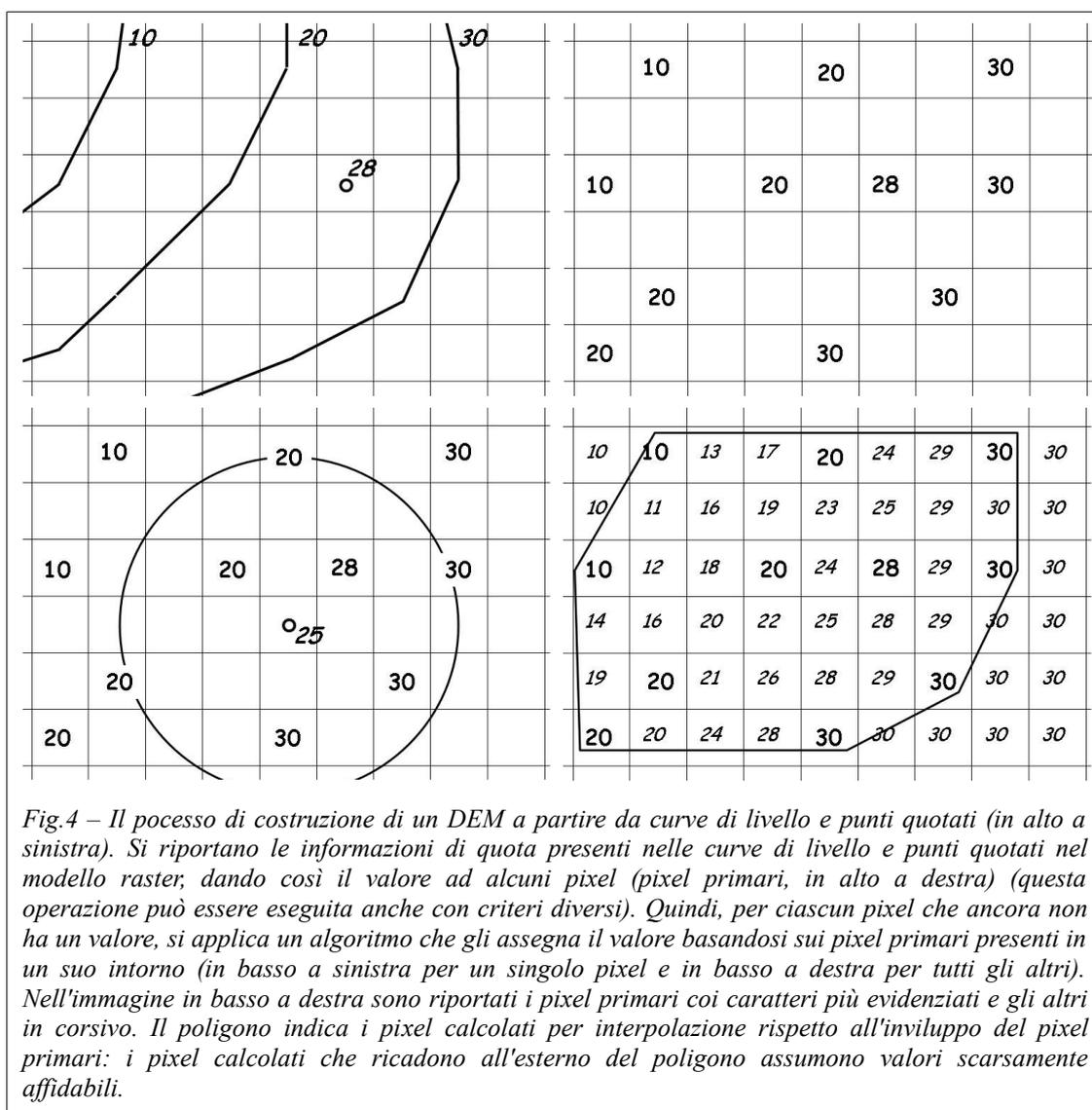
- una trasformazione dei dati lineari (isoipse) e/o puntuali (punti quotati) da formato vettoriale a raster; si ottiene così un DEM, dove solo alcuni pixel assumono un valore (chiamiamoli pixel primari) mentre la maggior parte restano indefiniti;
- un'interpolazione spaziale, la quale assegna a ciascun pixel non trattato nel passo precedente un valore basato sui pixel cui era stato assegnato un valore; in questa fase si utilizzano in genere i pixel primari presenti in un intorno predefinito del pixel di cui si calcola il valore.

Questo procedimento è soggetto ad una serie di errori:

- le curve di livello originali sono, come ogni dato, affette da errore
- la trasformazione da formato vettoriale a raster risente della dimensione finita del pixel

- il processo di interpolazione è ulteriore fonte di errore, a volte con risultati inaspettati. L'utilizzo di diversi algoritmi di interpolazione può dare risultati abbastanza diversi tra loro.
- in certe parti dello spazio dove si opera, è possibile che il processo di interpolazione non trovi un numero sufficiente di pixel primari, o che i pixel primari trovati siano spazialmente asimmetrici

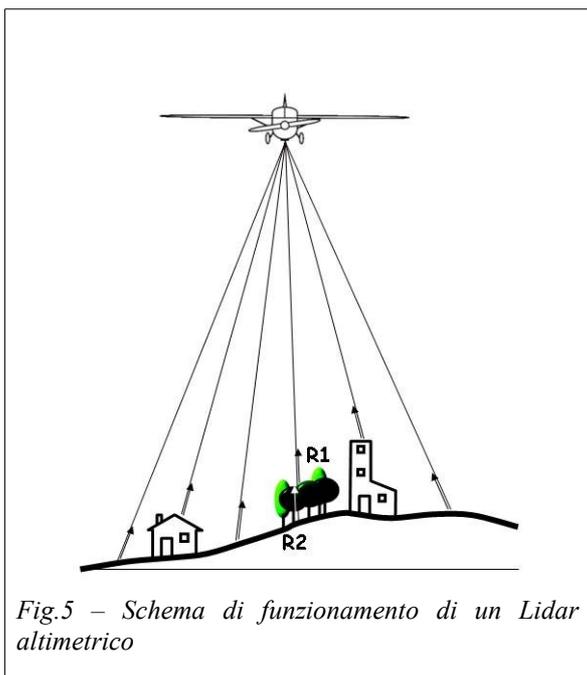
Le varie fasi del processo sono schematizzate in Fig.4.



Il criterio di interpolazione utilizzato nell'esempio di Fig.4 è intuitivo; sui criteri di interpolazione, tuttavia, esiste una vasta letteratura ed esistono diversi metodi, ciascuno con varianti e parametri, e i Software GIS ne implementano in genere diversi. Per la scelta di un corretto criterio di interpolazione e il suo controllo, si rimanda a documentazione specializzata.

#### Caso 4

Un ulteriore metodo per la costruzione di un DEM si basa sull'utilizzo del LIDAR, acronimo di *Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*; questo criterio è molto diffuso per l'alta qualità del risultato. Il sistema si basa su un trasmettitore laser che invia segnali da un aereo verso terra e uno strumento che calcola i tempi di ritorno, proporzionali al tragitto fatto dal raggio luminoso: da questo si risale alla quota del terreno. (Fig.5).

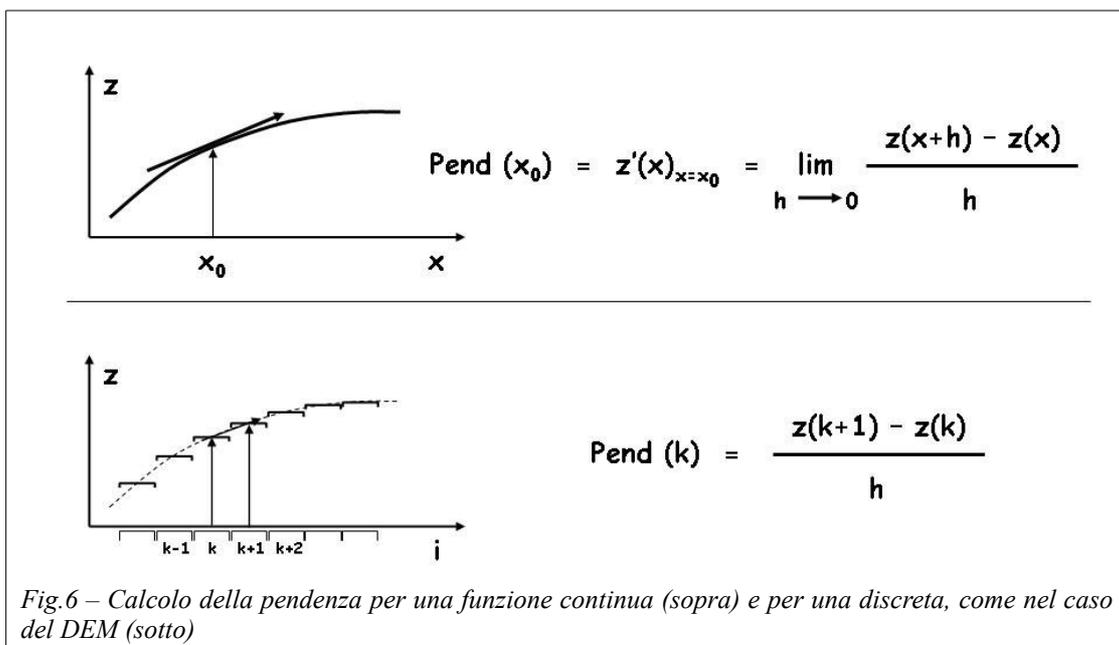


Si rimanda alla letteratura specializzata per un'analisi dettagliata su questo impiego del Lidar; è comunque interessante notare come, in presenza di edifici, la quota rilevata è quella del tetto (DSM), mentre nel caso della vegetazione si ha un primo impulso di ritorno quando il raggio incontra la chioma degli alberi (R1) e un secondo quando una frazione del raggio, che ha perforato la copertura boschiva, incontra il suolo (R2); si ha così l'informazione necessaria sia per un DSM che per un DEM. Inoltre la potenza del segnale riflesso dipende dalla superficie dell'oggetto incontrato dal raggio, fornendo così un'ulteriore informazione.

#### 4 - Dati derivati da un DEM

Da una matrice di quote è possibile derivare ulteriori dati; tra questi sono tipici le matrici di pendenza ed esposizione.

Per analizzare il concetto di pendenza, supponiamo, per semplicità di operare non in due dimensioni, così come accade per un DEM, ma in un'unica dimensione, come se analizzassimo il profilo di una strada. Se conoscessimo, nel caso ideale, il profilo della strada tramite una funzione  $z(x)$ , la pendenza in un punto sarebbe calcolabile come la derivata della funzione in quel punto.



Se analizziamo la parte destra della formula di Fig.6 in alto, vediamo che per valutare la pendenza si calcola il valore della funzione (nel nostro caso la quota) nel punto di interesse e in un punto poco più

avanti; quindi si fa la differenza tra i due valori (differenza di quota) e la si divide per la distanza tra i due punti, ottenendo così il valore della pendenza come  $\Delta z/\Delta x$ . Il valore di pendenza viene calcolato portando al limite, cioè a valori piccolissimi, il  $\Delta x$ . Questo è possibile perché la funzione  $z(x)$  è una funzione continua, ma purtroppo questo non è vero nel caso raster, dove la struttura del dato è discreta.

Nel caso raster il processo è analogo, cioè si misura la quota al pixel “k” e al pixel successivo “k+1”; quindi si fa la differenza tra i due valori di quota e la si divide per la distanza tra i due punti, che è la dimensione del pixel. Si ottiene così il valore della pendenza, sempre come  $\Delta z/\Delta x$ .

Poiché il terreno (e il DEM che lo modella) sono a due dimensioni, dobbiamo estendere quanto fin qui detto. Quando ci troviamo su un terreno in pendenza, notiamo che, a seconda della direzione in cui ci muoviamo, la pendenza è diversa. Immaginiamo di essere in un qualsiasi punto di un terreno descritto dal DEM di Fig.7. Si tratta di un terreno inclinato in modo regolare e se, come useremo anche di seguito, si intende che il Nord sia in alto e l'Est a destra, vediamo che è inclinato verso Est. Se noi, da un punto qualsiasi, facciamo un passo verso Nord, non notiamo alcuna pendenza, così come se lo facciamo verso Sud; se invece ci muoviamo verso Est notiamo una pendenza in discesa e verso Ovest un'uguale pendenza in salita. È abbastanza facile immaginare che muovendoci in direzioni intermedie (p.es. verso Nord-Est) avremo una pendenza intermedia tra quella rilevata verso Est e quella (zero in questo caso) rilevata verso Nord. In pratica, dato un punto su un terreno, rileveremo una pendenza diversa per ciascuna direzione.

54	51	48	45	42	39	36	33	30
54	51	48	45	42	39	36	33	30
54	51	48	45	42	39	36	33	30
54	51	48	45	42	39	36	33	30
54	51	48	45	42	39	36	33	30
54	51	48	45	42	39	36	33	30

Fig.7 – Il DEM di un terreno inclinato verso Est, con pendenza costante.

La questione è quale sia la pendenza da associare al punto in cui ci troviamo: la pendenza da associare al punto è la massima, in valore assoluto, tra le pendenze misurate in tutte le possibili direzioni. Associato è il concetto di esposizione, che è la direzione verso la quale si ha la massima pendenza, in senso discendente; quindi, tornando alla Fig.7, l'esposizione è verso Est.

La pendenza si misura in “percento” (una pendenza del 15% indica un  $\Delta z/\Delta x$  uguale a 15m di dislivello per ogni 100 m di distanza) o come angolo, espresso in gradi o in radianti; l'esposizione si misura in gradi considerando 0 gradi l'esposizione a Nord, 90 gradi quella a Est e così via.

Tornando all'immagine di Fig.3, si capisce l'importanza che il segmento che unisce A con B sia il più corto possibile, cioè quello, tra tutti i possibili, che ha il  $\Delta x$  minore, in quanto questo implica automaticamente che il rapporto  $\Delta z/\Delta x$  sia il maggiore tra i possibili. In questo caso il  $\Delta z/\Delta x$  rappresenta la pendenza associata al punto P e la direzione del segmento A-B l'esposizione, in direzione della curva di livello a quota minore.

Nel caso “discreto”, tipico del dato raster, la pendenza associabile ad un pixel si ottiene dall'analisi della quota del pixel in relazione a quelli circostanti e in funzione della dimensione del pixel. Consideriamo la matrice riportata in Fig.8 (parte sinistra) e in particolare il pixel evidenziato al centro. Se

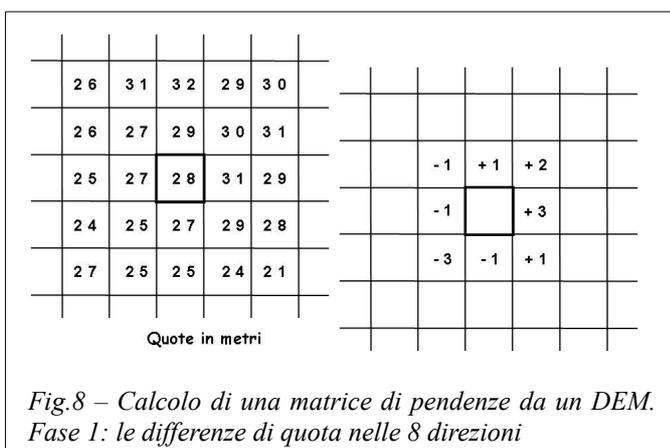
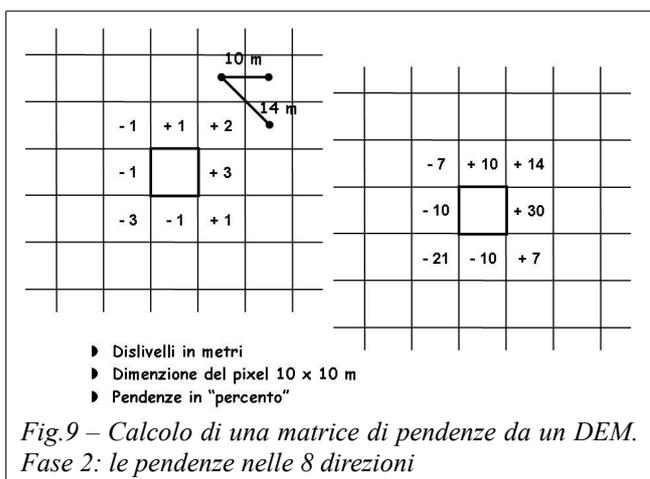


Fig.8 – Calcolo di una matrice di pendenze da un DEM. Fase 1: le differenze di quota nelle 8 direzioni

immaginiamo di trovarci proprio in quel punto su terreno e ci spostiamo verso Nord (lato alto della matrice) la quota sale di 1 m; il dislivello è quindi 1. Se ci muoviamo verso Ovest scendiamo di 1 m, verso Sud scendiamo ancora di 1 m, e infine verso Est saliamo di 3 m. Per le direzioni intermedie, vediamo che muovendoci verso Nord-Ovest scendiamo di 1 m, ma occorre considerare che la differenza di quota è calcolata tra due punti, virtualmente i “centri pixel”, che sono tra loro più distanti di quanto lo siano quelli lungo gli assi principali nord-sud est-ovest.

È possibile così costruire una matrice 3x3 avente al centro il pixel sotto analisi e sulla sua cornice le differenze di quota (Fig.8 lato destro), ricordandosi però che la pendenza generata da un +1 in direzione Nord produrrà una pendenza diversa dal +1 in direzione Sud-Est.



Supponendo ancora che la dimensione dei pixel sia, ad esempio, di 10 x 10 m, possiamo costruire una matrice 3x3, sulla struttura di quella precedente, dove al posto delle differenze di quota riportiamo le pendenze, normalizzate sulle diagonali (Fig.9).

Infine, se tra queste 8 pendenze scegliamo la maggiore in valore assoluto, questa è la pendenza associabile al pixel considerato, nel caso specifico il valore maggiore è 30% (cioè 3 m di dislivello su 10 di distanza) e l'esposizione è in direzione Est-Ovest, con verso Ovest in quanto dal pixel centrale a quello che ha determinato la pendenza (il pixel ad Est) si sale.

Ripetendo questo insieme di operazioni per tutti i pixel della matrice, otteniamo una matrice di pendenze, espresse, in questo caso, in “percento” e una di esposizioni dove ad ogni pixel è associato il valore della direzione della pendenza massima. Questo valore di direzione può essere espresso in gradi (8 valori possibili: “0” (verso Nord), “45” (verso Nord-Est), “90” (verso Est) e poi ancora 135, 180, 225, 270, 315) o con simboli (le 8 direzioni principali della rosa dei venti). A questi 8 valori va aggiunto un nono, da utilizzare nel caso in cui ci si trovi in pianura. Se infatti la pendenza è zero in tutte le direzioni l'esposizione è nulla.

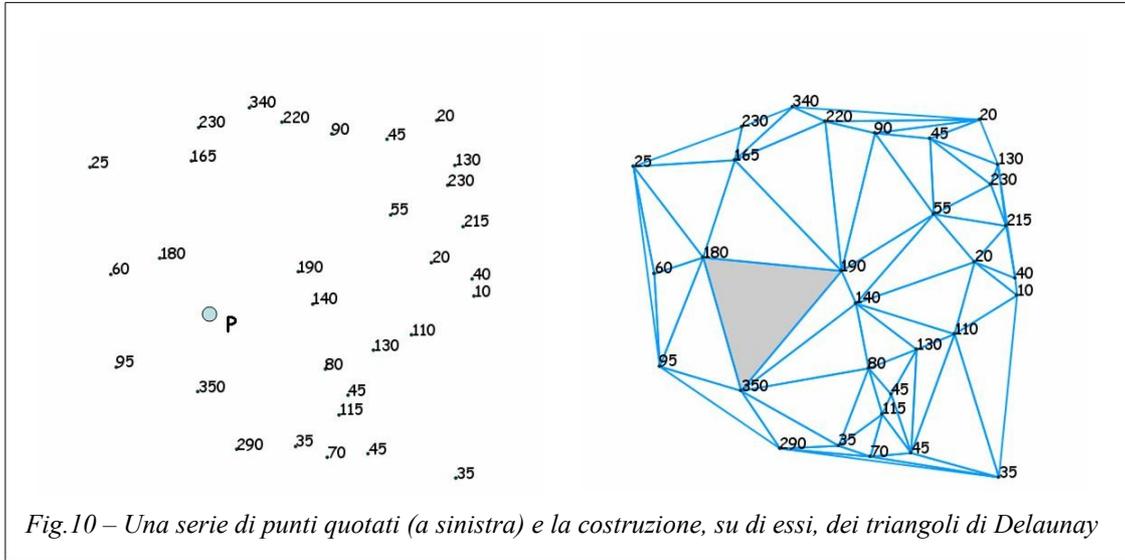
L’algoritmo che abbiamo proposto per il calcolo della pendenza (e di conseguenza per l’esposizione) è uno di una serie di algoritmi noti trattati dalla letteratura e implementati nei Software GIS. Una caratteristica negativa di questo algoritmo è quella di essere molto sensibile alle variazioni e quindi anche agli errori presenti nel DEM. Un valore errato nella matrice delle quote, molto diverso dai valori vicini, causa errori non solo nel pixel corrispondente nelle matrici di pendenza e esposizione, ma anche negli 8 circostanti; in pratica, durante l’elaborazione, l’errore si propaga espandendosi.

## 5 – TIN (Triangulated Irregular Network)

Come abbiamo visto al par.1, per rappresentare le forme del terreno possiamo utilizzare le curve di livello, i punti quotati e il modello raster, quest'ultimo solo nel mondo GIS, gli altri anche in cartografia. Esiste un ulteriore modo per rappresentare la forma del terreno, noto come TIN: Triangulated Irregular Network.

Immaginiamo un insieme di punti quotati, come in Fig.10. Ciò che noi conosciamo è il valore della quota alle coordinate dei punti noti, e l'obiettivo è conoscere la quota in tutti i punti dell'area. L'approccio del modello TIN è che la quota in un generico punto può essere calcolata basandosi sulle quote di tre punti noti circostanti, opportunamente scelti. Per esempio la quota del punto P nella Fig.10 sinistra sarà calcolata in funzione delle coordinate e delle quote dei tre punti circostanti con altezza 180, 190 e 350. Per mettere in pratica questo principio, si costruisce una rete di triangoli non sovrapposti, ciascuno dei

quali ha i tre vertici su tre punti noti e in tutta l'area di un triangolo i valori di quota verranno calcolati utilizzando le caratteristiche dei tre punti che compongono il triangolo.



Si può immaginare quanto detto considerando ogni punto quota come un punto in uno spazio tridimensionale. In Fig.11 in alto a sinistra i tre punti sul piano (rappresentati con l'ovale) e la loro posizione in una visione prospettica (il pallino nero); la lunghezza del segmento dall'ovale al pallino nero rappresenta la quota del punto. Il modello TIN approssima quella zona di territorio col triangolo della Fig.11 in alto a destra. La forma del territorio in tutta l'area si può quindi immaginare come descritta da un insieme di triangoli che, rappresentati in prospettiva, danno un'efficace rappresentazione visiva del fenomeno. (Fig.14). Se esaltiamo le quote, amplificandole artificialmente, vediamo meglio il fenomeno ( Fig.11 in basso a sinistra). Poiché per tre punti nello spazio passa un solo piano, abbiamo che:

- 1) all'interno dell'area coperta dal triangolo la quota si ottiene con un'interpolazione lineare
- 2) all'interno dell'area coperta dal triangolo tutti i punti hanno pendenza costante
- 3) all'interno dell'area coperta dal triangolo tutti i punti hanno esposizione costante

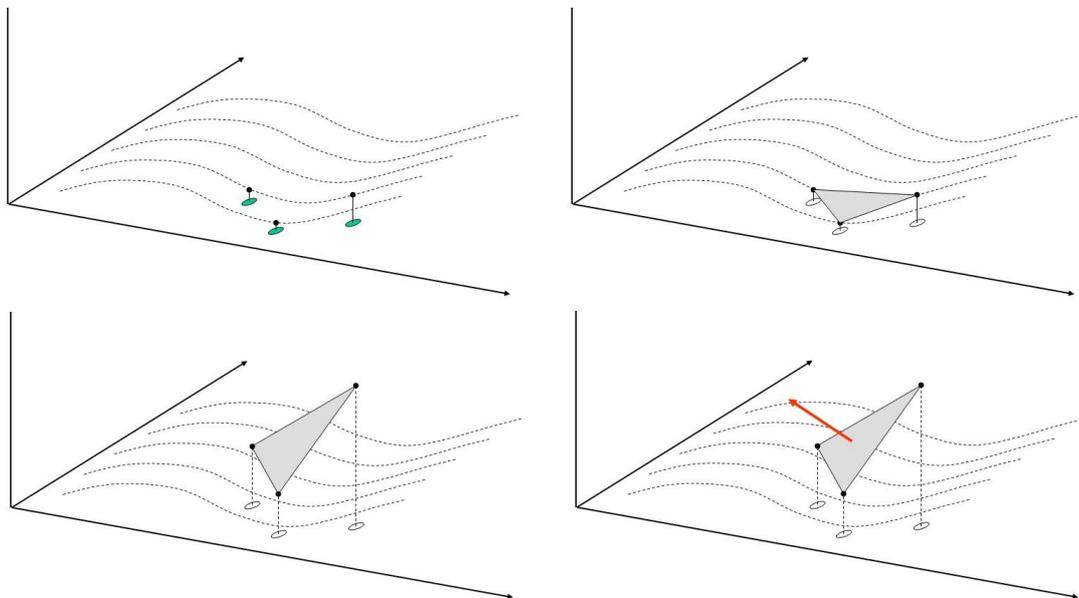
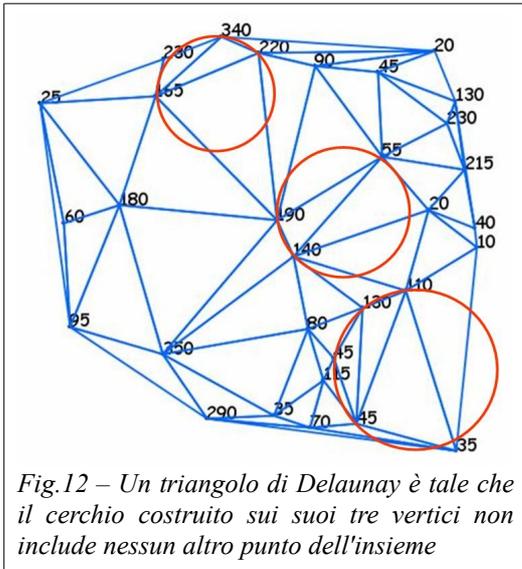


Fig.11 – Rappresentazione prospettica di un "triangolo di Delaunay" da cui si apprezza la costanza della pendenza e dell'esposizione nell'area coperta dal triangolo.

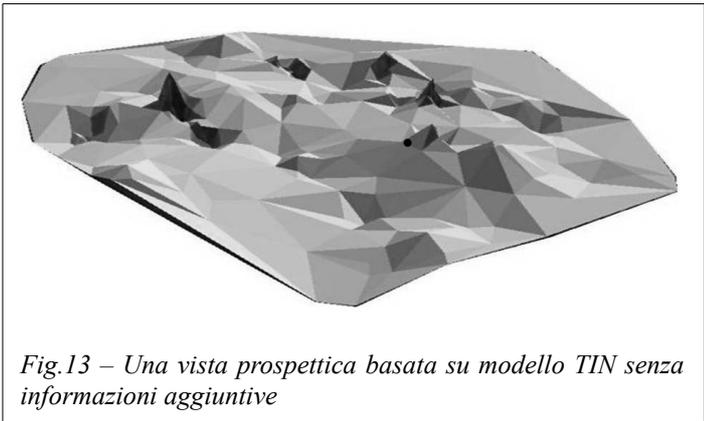


*Fig.12 – Un triangolo di Delaunay è tale che il cerchio costruito sui suoi tre vertici non include nessun altro punto dell'insieme*

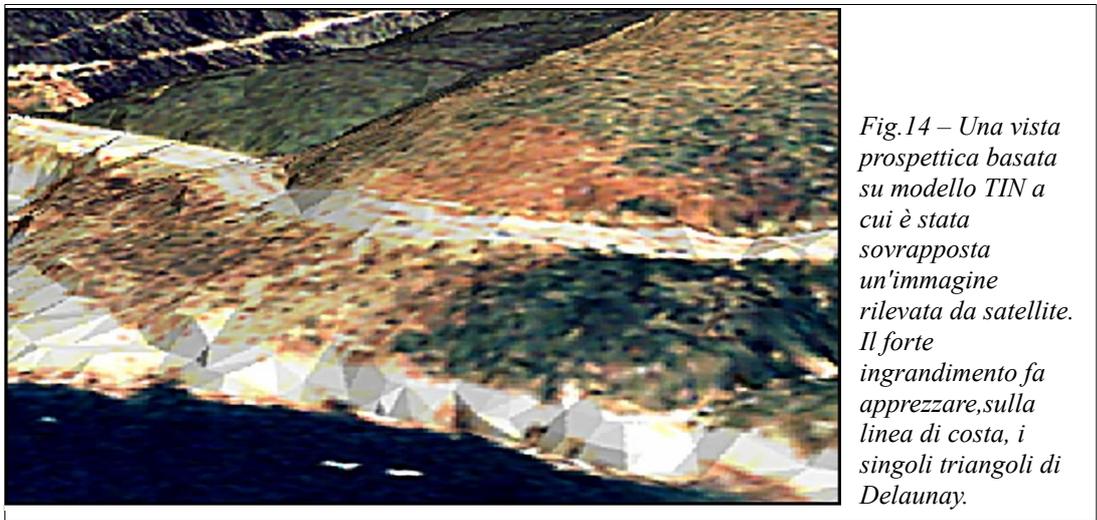
E' importante il criterio con cui si definisce l'insieme dei triangoli, tra le innumerevoli combinazioni possibili. La strategia è quella di costruire triangoli tali che ogni punto interpolato sfrutti informazione presente nel suo intorno, la più vicina possibile e la più simmetrica possibile. Questa condizione è soddisfatta dal criterio di Delaunay, utilizzando il quale i triangoli sono mediamente “i più equiangoli possibile”; in pratica si evitano triangoli stretti e lunghi. Da un punto di vista geometrico, un triangolo di Delaunay è tale che il cerchio costruito sui suoi tre vertici non include nessun altro punto. (Fig.12).

Una caratteristica del TIN è la distribuzione irregolare dei punti noti. Se pensiamo alle curve di livello e ai punti quotati della cartografia, e alla loro caratteristica di essere più densi là dove la variabilità della quota è maggiore, vediamo che l'approccio del TIN è analogo; al contrario dell'approccio raster, in cui la risoluzione è la stessa su tutta l'area in esame.

TIN e DEM vanno visti come due strumenti complementari e esistono SW per passare da uno all'altro. Il TIN rappresenta la forma del territorio in un modo più flessibile, più accurato dove serve e meno denso di dati dove è sufficiente, si presta bene a modifiche interattive e certe linee importanti del territorio, come i crinali, gli impluvi, gli orizzonti sono lati di triangoli di Delaunay; il formato raster, da parte sua, rende particolarmente veloci alcune operazioni e l'integrazione del DEM con altri tipi di dati. Nel caso della visualizzazione prospettica, poi, il TIN permette di apprezzare la forma del territorio simulando un'illuminazione e un punto di vista: le varie faccette dei triangoli assumono, sulla base di questa ipotesi, una diversa intensità di colore (Fig.13); la stessa operazione è possibile appoggiando sul TIN un'immagine, reale o simulata, ottenendo effetti di buon realismo. (Fig.14)



*Fig.13 – Una vista prospettica basata su modello TIN senza informazioni aggiuntive*



*Fig.14 – Una vista prospettica basata su modello TIN a cui è stata sovrapposta un'immagine rilevata da satellite. Il forte ingrandimento fa apprezzare, sulla linea di costa, i singoli triangoli di Delaunay.*